



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2016.01.026

谌威, 许模, 郭健, 等. 山区中小型水库滑坡堵江预测及负效应分析[J]. 2016, 14(1): 155-160.

CHEN Wei, XU Mo, GUO Jian, et al. Prediction of landslide damming in medium and small sized reservoir, mountainous area and its negative effects[J]. 2016, 14(1): 155-160. (in Chinese)

山区中小型水库滑坡堵江预测及负效应分析

谌威, 许模, 郭健, 肖先煊, 赵勇

(成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 成都 610059)

摘要: 库区滑坡失稳易引起堵江事件, 而堵江堰塞坝的高度则直接影响水库能否正常运营调度, 特别是对中小型水库而言。综合前人对滑坡堵江的研究成果, 以西南山区某中型水库库区滑坡堆积体为研究对象, 假设滑坡失稳堵江为完全堵江, 对滑坡堵江可能性进行预测, 着重选取三种方法对滑坡堵江的高度进行预测, 并讨论了滑坡堵江的负效应, 从而完成对库区滑坡堵江的风险性预判。以此初步建立了针对山区中小型水库滑坡堵江预测的研究思路, 以期为此类问题的分析提供参考。

关键词: 山区; 中小型水库; 滑坡; 堵江预测; 负效应

中图分类号: P642 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2016)01-0155-06

Prediction of landslide damming in medium and small-sized reservoir, mountainous area and its negative effects

CHEN Wei, XU Mo, GUO Jian, XIAO Xianxuan, ZHAO Yong

(State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: The natural landslide damming is much more likely to happen in the reservoir area, and the height of landslide dams directly affects the normal operation of reservoir, especially for medium and small sized reservoirs. In this paper, the author summarized previous research results on landslide blocking river and studied the landslide accumulation body in the reservoir area of a medium sized reservoir in Southwest China on the basis of assume that it is blocking the river completely, predicting the possibility of landslide damming of the river. Then the author particularly selected three methods to predict the height of the dam and discussed its negative effects, so as to complete the risk prediction of landslide damming of river in reservoir area. On this account the author has preliminarily built the basic research thinking for the prediction of landslide damming of river in medium and small sized reservoir of mountainous area, in order to provide a certain reference for solving this kind of problem.

Key words: mountainous area; medium and small sized reservoirs; landslide; prediction of landslide damming; negative effects

极端气候频繁出现使我国西南地区工程性缺水问题突出, 西南山区大江大河支流密布, 中小型水库的兴建不但解决了缺水问题, 同时在防洪、发电中也发挥着重要作用。考虑到水库群的梯级调度, 水库建设将难以避免一些地质灾害多发点, 加之支流河

道狭窄, 易发生滑坡失稳堵塞河道。国内外对此已有研究, 如 Schuster 和 Costa 早在 1986 年就指出, 滑坡堵江对水电工程及其发展构成的最基本灾害是对建在堵江坝体上游、堰塞湖淹没区的工程设施的危害, 而国内柴贺军等也曾对中国堵江滑坡的类型

收稿日期: 2015-10-11 修回日期: 2015-12-17 网络出版时间: 2016-02-27
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20160227.1633.013.html>
基金项目: 国家自然科学基金项目(41502244)

Fund: National Natural Science Foundation of China(41502244)

作者简介: 谌威(1991-), 男, 江西南昌人, 主要从事工程地质研究。E-mail: jxchenwei@yahoo.com

通讯作者: 许模(1963-), 男, 重庆涪陵人, 教授, 主要从事工程地质和工程水文地质等的教学与研究。E-mail: xm@cdut.edu.cn

及时空分布规律^[1,2]、滑坡堵江的生成条件及其与自然地质因素的关系^[3]、滑坡堵江形成的灾害链和环境效应链^[4]等问题进行了系统研究。但是目前,国内外对滑坡堵江事件的研究多为基于大量堵江数据对区域滑坡堵江问题展开系统研究,或是通过大型崩滑堵江事件形成机理、溃坝方式以及环境效应的分析^[5,8],对中小型水库滑坡堵江成灾的可能性进行预测,而对库区滑坡堵江高度预测缺乏系统性研究,而事实上堵江高度与中小型水库能否正常运营调度紧密相关。滑坡堵江包含失稳下滑和堵塞河道两个复杂的动力学过程,受到多个模糊因素的影响,难以用精确的数学方法来刻画^[9-12],笔者认为采用地质过程分析结合统计分析^[13]的方法来预测堵江具有一定现实意义。

在综合前人对滑坡堵江的大量研究成果的基础上,本文对西南某中型水库滑坡堵江进行预测。由于认识水平有限和研究对象的复杂性,有些问题的分析尚存在不足,但作者仍然愿意和广大研究者共同探讨,以期后续研究提供基础认识和启发。

1 滑坡体的地质概况

黄角树古滑坡位于西南某在建中型水库上游左岸(见图 1),孕育于蓬莱镇组紫红色砂岩、粉砂岩夹泥岩岩层内,岩层产状 N88°W/SW ∠11°。在两组陡倾的优势 X 型剪节理控制下,砂岩层沿其下伏相对软弱的泥岩层产生蠕滑拉裂变形,拉裂缝不断向山体深部和高处发展,至贯通形成滑移面;在前缘剪出口地形的约束下,变形模式转化为滑移弯曲线破坏,待前缘锁固段完全剪断,滑坡发生溃决式破坏,滑坡前缘反翘现象也印证了滑坡这种破坏模式。

依据滑坡调查圈定范围及钻孔内滑带高程,估算古滑坡体方量约 190 万 m³。古滑坡体上的变形迹象主要集中在其前缘,由调查访问判断古滑坡前缘在 5·12 地震及之后多次强降雨作用下发生复活。通过分析裂缝发育部位、发育方向和地形地貌特征,在古滑坡前缘划定了一个古滑坡前缘变形体(图 1),方量约 96 万 m³。

2 滑坡体稳定性分析

2.1 模型建立及参数选取

滑坡稳定性计算采用 Geor Studio 中的 SLOPE/W 和 SEEP/W 模块。通过这两个模块可计算考虑孔隙水压力条件下的边坡稳定性。调查发现,古滑坡体上的拉张裂缝多平行于河流方向,由此判断古滑坡复活变形方向为垂直河流方向。因此,选取 4

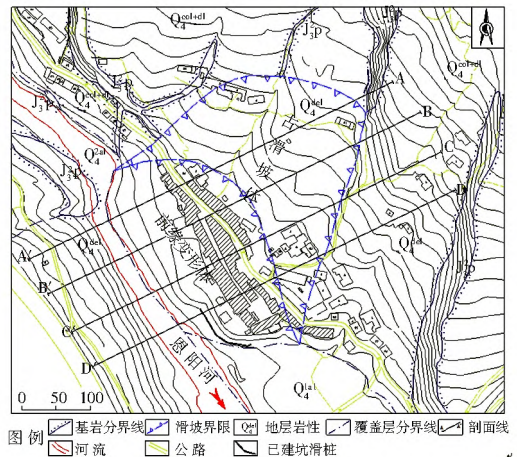


图 1 工程地质平面图

Fig. 1 Plan view of the engineering geology

条垂直河流方向的剖面计算滑坡稳定性。

对于模型参数取值,则根据室内初步实验结果与现场调查的参数反演分析以及工程地质类比的方法综合确定,各参数取值见表 1。

表 1 滑坡体物理力学参数综合取值

Tab. 1 The physical and mechanical parameters of the landslide

计算材料	天然状态		饱和状态		天然状态		饱和状态	
	c /kPa	φ /°	c /kPa	φ /°	ρ_d /(kN·m ⁻³)	ρ_{sat} /(kN·m ⁻³)	ρ_d /(kN·m ⁻³)	ρ_{sat} /(kN·m ⁻³)
滑体	21	18	17	15	18.5	21		
潜在滑带	6	8.5	5	7.8	26	26.8		
古滑带	9	13	8	11	27.2	29		
滑床	15	20	12	17.5	23.2	25		

2.2 计算过程及结果

为研究滑坡各阶段的稳定性,根据水库实际运行条件,分别计算古滑坡整体和前缘变形体在天然、暴雨、水位 1 m/d 上升和水位 1 m/d 下降四种工况下的稳定性。由计算结果可知(见表 2),前缘变形体在暴雨及水库运行工况下表现为欠稳定和不稳定状态,可能引起堵江;古滑坡整体较稳定,但计算时并未考虑前缘变形体失稳对其后部堆积体的牵引作用及库水位变化引起的水致弱化效应,因此有必要对古滑坡整体失稳堵江进行预测。

3 滑坡体堵江预测

3.1 堵江条件

由上文可知,黄角树滑坡存在失稳破坏的可能,但能否造成完全堵江,还取决于河床情况、河水流量和滑坡入江体积等条件。构成完全堵江的最小入江土石方量 V_{min} 可通过下式计算获得^[3]:

$$V_{min} = L_d \cdot H_r \cdot B_r - H^2 B_r \left[\frac{1}{2 \tan 14^\circ} + \frac{1}{2 \tan \varphi_s} \right] \quad (1)$$

表 2 各工况下稳定性综合计算结果

Tab.2 The calculated stabilities under different conditions

计算工况	综合系数	评价结果
古滑坡	天然	1.373 稳定
	暴雨	1.367 稳定
	1 m/d 上升	1.316 稳定
	1 m/d 下降	1.258 稳定
前缘变形体	天然	1.123 稳定
	暴雨	1.030 欠稳定
	1 m/d 上升	0.966 不稳定
	1 m/d 下降	0.900 不稳定

注:综合系数为 4 个剖面计算结果中的最小值。

式中: V_{min} 为完全堵江所需要的最小土石方量(m^3); L_d 为坝底宽度(m); H_r 为河水深度(m); B_r 为河床宽度(m); φ_s 为堵江岩土体饱水状态下的内摩擦角(见图 2)。

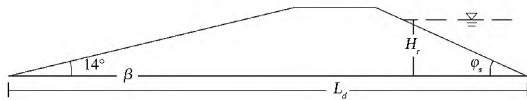


图 2 堵江坝体纵剖面示意图

Fig.2 Cross section of a landslide dam

一般情况下,河床坡降 β 可视为水平。下游坡度可采用堵江物质发生水石流的起始坡度,一般取 14° [14]。由国内外典型滑坡天然坝形态调查发现,坝底宽是坝高的 8~10 倍,若取 $L_d = 9H_r$, 则式(1)

表 4 堵江模式

Tab.4 The patterns of landslide damming

堵江模式	失稳堵江体	入江方量/万 m^3	诱发滑坡堵江的因素
模式一	前缘变形体整体失稳	9.6	在暴雨或库水位升降条件下,在地下水的增重效应、水岩物理化学等作用下,滑坡岩土体力学性质弱化,抗剪强度下降,从而失稳堵江
模式二	古滑坡整体失稳	19	在库水位升降条件下,在前缘变形体失稳下滑的牵引力及地下水升降引起的弱化效应作用下,抗剪强度下降,可能失稳堵江

3.3 堵江高度计算

复杂地质条件使得想要准确计算滑坡堵江高度十分困难。通过各方法适用性分析,本文采用割补法、滑距推算法和回归分析经验公式对黄角树滑坡的堵江高度进行预测分析。

(1) 割补法。

“割补法”是几何学的重要思想方法,用这种方法求解滑坡堵江高度是一种新的尝试,即认为剖面上的滑坡体失稳下滑是进行地形修复的一个过程。用“割补法”预测堵江高度时,不但要遵循割补前后的面积量或者体积量不变,同时应充分考虑地质条件对割补的控制性作用。考虑到黄角树滑坡滑面倾角并不大,且河流深度较小,因此推断下滑堆积过程以近水平的滑移堆积方式为主,并根据地形对堆积

可简化为:

$$V_{min} = H_r^2 \cdot B_r \cdot (7 - 0.5 \cot \varphi_s) \quad (2)$$

由式(2)可以看出,完全堵江所需的最小土石方量 V_{min} 与河床宽度 B_r 、河床水深 H_r 的平方成正比。因此,河床越窄,河水越浅,所需的入江体积就越小,这也说明河道狭窄的两岸易发生滑坡堵江。对黄角树滑坡完全堵江的最小土石方量进行计算,结果见表 3。

表 3 完全堵江最小土石方量

Tab.3 The minimum earthwork of complete landslide damming

H_r /m	B_r /m	φ_s ($^\circ$)	V_{min} / m^3	前缘变形体入江方量/ m^3	古滑坡整体入江方量/ m^3
14	25	15	2.5×10^4	9.6×10^4	19×10^4

对于滑坡下滑入江方量,目前尚无较为准确的计算方法,一般采用经验值。三峡库区以往滑坡堵江 [14] 时入江方量占滑坡总方量的 1/8~1/11,故本文采用滑坡总方量的 1/10 为入江方量进行考虑(表 3),则预测的入江方量足够满足完全堵江的最小方量。

3.2 滑坡堵江模式

由地质过程分析可知,黄角树滑坡可能的完全堵江特征为以整体的形式和一定的速度冲入河床,并沿河谷上、下游以碎屑流的形式扩展一段距离,形成较宽厚的堰塞坝。由稳定性计算结果和地质分析结果,将黄角树滑坡的堵江模式归纳为两种(见表 4)。

形态进行调整(见图 3)。由预测结果可知,模式一条件下堵江高度约 9 m,堰塞坝坝顶高程 355 m;模式二条件下堵江高度约 16 m,堰塞坝坝顶高程 362 m。

(2) 滑距推算法。

1973 年奥地利学者 A. E. Scheidegger 在调查了世界上 33 个大型滑坡的运动特征后,提出了等价摩擦系数 f 的概念,并发现动摩擦系数随滑坡体积的增大而减小的关系为

$$\lg f = a \lg V + b \quad (3)$$

式中: f 为摩擦系数; V 为滑坡体积(m^3); a, b 为系数, $a = -0.15666, b = 0.62219$ 。

滑坡开始滑动后,势能在滑动过程中消耗于滑道上,克服摩擦力做功并转化为热能,海姆认为可按下式计算最大滑距 L_{max} :

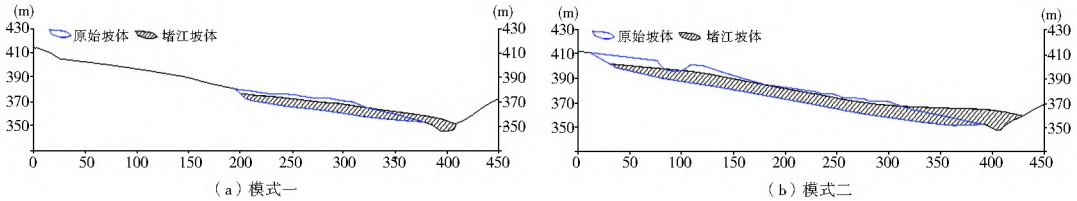


图 3 不同模式堵河分析剖面图

Fig. 3 Cross section of different patterns of landslide damming

$$L_{max} = H/f \quad (4)$$

式中: H 为滑坡后缘拉裂面顶点至滑程上计算点的垂直落差。

因此知道滑坡体积即可估算出动摩擦系数, 并得出最大滑动距离。一般情况下, 如果滑坡的滑距超过对岸的河岸线, 则河流就有可能被堵断, 按照滑体大致可能整体运动的原则, 则堵江高度可采用下式计算:

$$H_d = (1 - L_1/L_{max})(1 + f)h_1 + L_{max}/B \quad (5)$$

式中: B 为河流的宽度(m), 本次计算取 28; L_1 为滑坡前缘到江对岸的距离(m), 本次计算取 36; f 为动摩擦系数; h_1 为滑体的平均厚度(m); L_{max} 为计算滑距(m); H_d 为堵江高度(m)。由此计算的滑坡堵江高度见表 5。

表 5 堵江高度计算结果

Tab. 5 The calculated height of the dam

滑动模式	滑坡体积 V / 万 m^3	h_1 / m	H / m	f	L_{max} / m	H_d / m	坝顶高程 / m
模式一	96	8	31	0.48	64	7.5	353.5
模式二	190	18	43	0.44	98.8	20	366

(3) 经验公式法。

黄润秋等将整个滑坡堵江事件的发生、发展作为一个系统过程, 依据 32 个统计资料发现, 堰塞坝的体积 V_d 与坝高 H_d 存在如下相关关系^[16]:

$$H_d = -355.73 + 65.01 \lg V_d \quad (6)$$

相关系数: $r = 0.8736$

由于黄角树滑坡的入江体积并不像 32 个统计资料中堰塞坝的体积那样大, 直接采用式(6)计算并不恰当。本文选取与黄角树滑坡入江体积接近的统计资料进行回归分析, 得到回归分析经验公式(见图 4)。

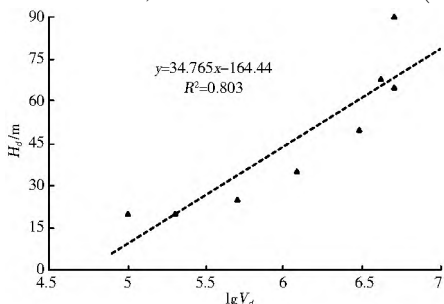


图 4 堵江天然堆石坝体积(V_d)与坝高(H_d)关系

Fig. 4 Diagram showing the relation of volume of natural dams with its heights

依据回归分析经验公式对黄角树滑坡完全堵江形成堰塞坝的高度进行计算, 堰塞坝体积采用表 3 中计算的入江体积。结果可知, 模式一条件下堵江高度 88 m, 堰塞坝坝顶高程 354.8 m; 模式二条件下堵江高度 19.1 m, 堰塞坝坝顶高程 365.1 m。

对比上述预测结果, 三种方法预测同一模式的堵江高度差距不大, 因此可认为预测结果具有较好的可信度。

4 负效应分析

滑坡堵江堰塞坝的存在及其溃决对山区中小型水库工程及沿岸和下游的环境有着重要的影响, 主要体现在以下几个方面。

(1) 对水库工程的影响主要是影响水库的调控功能, 若堰塞坝坝高大于库区正常蓄水位, 则水库大坝失去其蓄水功能; 若堰塞坝坝高大于库区死水位, 则影响水库的正常调度。根据计算结果, 模式一条件下预测的堰塞坝坝顶高程均未超过死水位 357 m, 对水库功能的影响较小; 模式二条件下预测的堰塞坝坝顶高程均大于死水位 357 m, 虽然古滑坡整体稳定性较好, 但从风险性预判角度考虑, 古滑坡的整体失稳将对水库功能产生较大影响。

(2) 滑坡失稳堵江过程中形成的涌浪不仅能冲毁库岸周围的各种工程建筑及威胁人民生命财产安全, 对于工程本身来说, 更重要的是随着涌浪的不断传播和叠加, 可能将会引起溃坝等严重水库安全事故。

(3) 完全堵江堰塞坝的存在将会引起上游淤积, 并在堰塞湖末端造成不同程度的淤积上延(翘尾巴)现象。在完全堵江历时较长的情况下, 堰塞湖中常形成一套湖泊相堰塞沉积物, 这些沉积物具有特殊的工程地质特性, 是水利水电工程建设中不可忽视的问题^[17-18]。

(4) 堰塞坝一旦溃决, 次生洪水携带堰塞坝的固体物质在下游河床上堆积并形成一定规模的覆盖层, 使得河谷地貌发生改变, 且极有可能减少库容, 甚至淤埋下游水库, 破坏水库设施^[19-21]。溃坝洪水在稳定性较差的堰塞湖两岸或堰塞坝下游两岸可能触发大量崩滑体。

5 讨论

滑坡能否完全堵江与滑动距离、滑速、河水流量等因素相关,很多因素直接或间接受到库水位周期性升降的影响,这也加大了库岸滑坡堵江预测的难度。对山区中小型水库而言,河道狭窄、河水动力条件较弱等使得滑坡完全堵江的可能性更大,因此,笔者认为中小型水库滑坡在具备一定堵江条件的基础上,对滑坡堵江为完全堵江的假设较合理。依据前人研究成果和对黄角树滑坡堵江的预测,初步建立针对山区中小型水库滑坡堵江预测的基本研究思路,见图5。

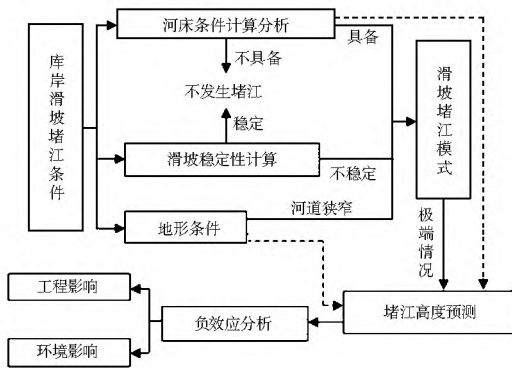


图5 中小型水库滑坡堵江预测基本思路

Fig. 5 The basic idea for prediction of landslide damming in medium and small sized reservoir

6 结论

(1)通过对某中型水库库区黄角树滑坡堵江预测结果可知,三种堰塞坝高度预测方法对两种堵江模式条件下的堵江高度预测具有较好的可信度,据此判断黄角树滑坡堵江在模式一条件下对水库功能影响较小,在模式二条件下对水库功能影响较大。

(2)滑坡堵江堰塞坝对中小型水库的负效应主要表现为对水库功能、水库设施的影响和对河道岩土体工程地质特性的改变,溃坝洪水也将影响库岸的稳定性。

(3)山区狭窄河谷地区,滑坡完全堵江的假设具有一定理论依据和重要现实意义,初步建立了针对山区中小型水库滑坡堵江预测的基本研究思路。

参考文献(References):

[1] 柴贺军,刘汉超,张悼元.中国堵江滑坡的类型及其特点[J].成都理工大学学报,1998,25(3):411-416.(CHAI Hejun, LIU Hanchao, ZHANG Zhuoyuan. Study on the categories of Landslide damming of river and their characteristics[J]. Journal of Chengdu Institute of Technology, 1998, 25(3):411-416. (in Chinese))

[2] 柴贺军,刘汉超,张悼元.中国堵江滑坡发育分布特征[J].山地学报,2000,18(增):51-54.(CHAI Hejun, LIU Hanchao,

ZHANG Zhuoyuan. The temporal soatial distribution of damming landslides in China [J]. Journal of Mountain Science, 2000, 18(Supplement): 51-54. (in Chinese))

[3] 柴贺军,刘汉超,张悼元.滑坡堵江的基本条件[J].地质灾害与环境保护,1996,7(1):41-46.(CHAI Hejun, LIU Hanchao, ZHANG Zhuoyuan. The main conditions of landslide dam[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 1996, 7(1): 41-46. (in Chinese))

[4] 柴贺军,刘汉超,张悼元.大型崩滑堵江事件及其环境效应研究综述[J].地质科技情报,2000,19(2):87-90.(CHAI Hejun, LIU Hanchao, ZHANG Zhuoyuan. New progress of the study of landslide damming and its environment effects[J]. Geological Science and Technology Information, 2000, 19(2): 87-90. (in Chinese))

[5] 罗刚.唐家山高速短程滑坡堵江及溃坝机制研究[D].成都:西南交通大学,2012.(LUO Gang. Analysis of blocking mechanism of Tangjiashan high speed short run landslide and dam breaking mode of Tangjiashan Barrier Dam [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012. (in Chinese))

[6] 徐则明,刘文连,黄润秋,等.滑坡堵江的地貌效应[J].第四纪研究,2014,41(1):128-133.(XU Zeming, LIU Wenlian, HUANG Runqiu, et al. Geomorphological effect of landslide damming[J]. Quaternary Sciences, 2014, 41(1): 128-133. (in Chinese))

[7] 王珊珊,胡瑞林,童立强.中国喜马拉雅山地区滑坡堵江编目及空间特征分析[J].工程地质学报,2015,23(3):361-372.(WANG shan shan, HU Rui lin, TONG Li qiang. Inventory of landslide dams at Himalaya, China and analyses of their spatial characteristic [J]. Journal of Engineering Geology, 2015, 23(3): 361-372. (in Chinese))

[8] 崔杰,王兰生,徐进,等.金沙江中游滑坡堵江事件及古滑坡体稳定性分析[J].工程地质学报,2008,16(1):6-10.(CUI Jie, WANG Lan sheng, XU Jin, et al. Stability analysis of old landslide for a possible ancient landslide event blocking middle of Jinsha River [J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(1): 6-10. (in Chinese))

[9] 吴新星,邓敏.阿拉滑坡形成机制及堵江分析[J].三峡大学学报:自然科学版,2010,32(3):48-51.(WU Xin xing, Deng Min. Formation mechanism of ala landslide and analysis on blocking River [J]. J of China Three Gorges Univ: Natural Sciences, 2010, 32(3): 48-51. (in Chinese))

[10] 董金玉,杨继红,伍法权等.顺层岩质边坡加速度响应规律和滑动堵江机制大型振动台试验研究[J].岩石力学与工程学报,2013,32(2):3861-3867.(DONG Jir yu, YANG Jf hong, WU Fa quan, et al. Large scale shaking table test research on acceleration response rules of bedding layered rock slope and its blocking mechanism of river [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(2): 3861-3867. (in Chinese))

[11] 吉峰,钟湖平.雅砻江中游某特大大型滑坡基本特征及稳定性初步分析[J].南水北调与水利科技,2010,8(5):92-95.(JI Feng, ZHONG Hu ping. Characteristics and stability of a large landslide in the Yalong River [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2010, 8(5): 92-95. (in Chinese))

[12] 陈刚,李世民,蔡敏.高川陈家坡滑坡的形成机制及稳定性评价[J].南水北调与水利科技,2011,9(1):134-138.(CHEN Gang, LI Shi min, CAI Min. Formation mechanism and sta

- bility evaluation of Chenjiapo Landslide in Gaochuan County [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2011, 9(1): 134-138. (in Chinese)
- [13] 樊晓一, 黄润秋, 乔建平, 等. 未受河流阻止的滑坡水平运动距离与滑坡堵江判别[J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(1): 128-133. (FAN Xiaoyi, HUANG Runqiu, QIAO Jianping, et al. Horizontal movement distances of non blocking landslide and blocking river assessment [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014, 41(1): 128-133. (in Chinese))
- [14] 周必凡. 泥石流防治指南[M]. 北京: 科学出版社, 1991. (ZHOU Bifan. Handbook of debris flow prevention and control[M]. Beijing: Science press, 1991. (in Chinese))
- [15] 地矿部成都水文地质工程地质中心, 成都地质学院, 水利部常委会勘测总队. 长江三峡工程库岸稳定性[M]. 北京: 科学出版社, 1992. (Chengdu Hydrogeology & Engineering Geology Center, Chengdu Institute of Geology, et al. On Stability of the Bank Slopes around the Three Gorges of the Yangtze River[M]. Beijing: Science Press, 2001. (in Chinese))
- [16] 黄润秋, 王士天, 张倬元, 等. 中国西南地壳浅表层动力学过程及其工程环境效应研究[M]. 成都: 四川大学出版社, 2001. (HUANG Runqiu, WANG Shitian, ZHANG Zheyuan, et al. The Dynamic Process of Earth's Superficial Crust and its Engineering Environmental Effects[M]. Chengdu: Sichuan University Press, 2001. (in Chinese))
- [17] 杨绍平, 王子忠. 崩滑堰塞湖沉积物工程地质特性研究[J]. 四川地质学报, 2013, 3(2): 192-195. (YANG Shaoping, WANG Zhong. Study of engineering geological characteristics of dammed lake deposit [J]. Acta Geologica Sichua, 2013, 3(2): 192-195. (in Chinese))
- [18] 韦方强, 刘淑珍, 范建容, 等. 小江流域生态环境灾害与治理对策[J]. 自然灾害学报, 2004, 13(4): 109-114. (WEI Fangqiang, LIU Shuzhen, FAN Jianrong, et al. Formation mechanism of landslide and analysis on blocking river [J]. Journal of Natural Disasters, 2004, 13(4): 109-114. (in Chinese))
- [19] 柴贺军, 董云, 李绍轩, 等. 大型天然土石坝的溃坝方式及环境效应分析[J]. 地质灾害与环境, 2005, 16(2): 172-176. (CHAI Hejun, DONG Yun, LI Shaoyuan, et al. Analysis of natural rock filled dam break mode and environmental effects [J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2005, 16(2): 172-176. (in Chinese))
- [20] 徐文杰, 陈祖煜, 何秉顺, 等. 肖家桥滑坡堵江机制及灾害链效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(5): 933-942. (XU Wenjie, CHEN Zuyu, HE Bingshun, et al. Research on river-blocking mechanism of Xiaojiaqiao landslide and disasters of chain effects [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(5): 933-942. (in Chinese))
- [21] 段立曾, 明庆忠, 张虎才, 等. 金沙江堵江堰塞事件及其地貌环境效应研究进展[J]. 地球科学前沿, 2013, 3: 8-17. (DUAN Lizeng, Ming Qingzhong, ZHANG Hucui, et al. Research progress of landslide dam events of Jinsha river and its geomorphologic and environment effects [J]. Advances in Geosciences, 2013, 3: 8-17. (in Chinese))

(上接第 154 页)

- [11] 王电龙, 张光辉, 冯慧敏, 等. 降水和开采变化对石家庄地下水流场影响程度[J]. 水科学进展, 2014, 25(3): 420-426. (WANG Dianlong, ZHANG Guanghui, FENG Huimin, et al. Contribution degrees of precipitation and groundwater exploitation to the groundwater flow field in Shijiazhuang [J]. Advances in Water Science, 2014, 25(3): 420-426. (in Chinese))
- [12] 费宇红, 张兆吉, 张凤娥, 等. 气候变化和人类活动对华北平原水资源影响分析[J]. 地球学报, 2007, 28(6): 567-571. (FEI Yurong, ZHANG Zhaoji, ZHANG Feng'e, et al. An analysis of the influence of Human activity and climate change on water resources of the North China Plain [J]. Acta Geoscientia Sinica, 2007, 28(6): 567-571. (in Chinese))
- [13] XU Xu, HUANG Guanhua, QU Zhongyi, et al. Using MODFLOW and GIS to assess changes in groundwater dynamics in response to water saving measures in irrigation districts of the upper Yellow River basin [J]. Water Resource Manage, 2011(25): 2035-2059.
- [14] 刘中培, 王富强, 于福荣. 石家庄平原区浅层地下水位变化研究[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(5): 124-127. (LIU Zhongpei, WANG Furuqiang, YU Furong. Variation of shallow groundwater level in Shijiazhuang plain [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2012, 10(5): 124-127. (in Chinese))
- [15] 王仕琴, 宋献方, 王勤学, 等. 华北平原浅层地下水位动态变化[J]. 地理学报, 2008, 63(5): 462-472. (WANG Shiqin, SONG Xianfang, WANG Qinxue, et al. Dynamic features of shallow groundwater in North China Plain [J]. Acta Geographica Sinica, 2008, 63(5): 462-472. (in Chinese))
- [16] 贾金生, 刘昌明. 华北平原地下水动态及其对不同开采量响应计算: 以河北省栾城县为例. 地理学报, 2002, 57(2): 201-209. (JIA Jinseng, LIU Changming. Groundwater dynamic drift and response to different exploitation in the North China Plain: A case study of Luancheng County, Hebei Province [J]. Acta Geographica Sinica, 2002, 57(2): 201-209. (in Chinese))
- [17] 张茂省, 朱立峰, 王小勇. 关中盆地地下水系统分析与地下水资源可持续开发利用对策[J]. 第四纪研究, 2005, 25(1): 15-22. (ZHANG Maosheng, ZHU Lipei, WANG Xiaoyong. Groundwater systems and sustainable development counter measures of groundwater resources in the Guanzhong Basin [J]. Quaternary Sciences, 2005, 25(1): 15-22. (in Chinese))
- [18] 张人权, 梁杏, 靳孟贵, 等. 于青春. 水文地质学基础[M]. 北京: 地质出版社, 2011. (ZHANG Renquan, LIANG Xing, JIN Menggui, et al. Fundamentals of Hydrogeology [M]. Beijing: Geology Publishing House, 2011. (in Chinese))
- [19] 周维博, 刘博洋. 西安市地下水资源保护利用规划[R]. 2014. (ZHOU Weibo, LIU Boyang. Protection and utilization planning of groundwater resources in Xi'an [R]. 2014. (in Chinese))
- [20] 邓聚龙. 灰理论基础[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 2002. (DENG Julong. Grey theory [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Publishing House, 2002. (in Chinese))